

Mus. civ. Rovereto	Atti del Workshop in geofisica	25 giugno 2009	89-97	2010
--------------------	--------------------------------	----------------	-------	------

ANTONIO MARIA BALDI, GABRIELE CEVENEINI, ROBERTO GAMBASSI & DUCCIO NOTARI (\*)

## L'ELABORAZIONE DEI VALORI DELLA VELOCITÀ SISMICA DI INTERVALLO HA CONSENTITO, MEDIANTE LA COSTRUZIONE DI UN MODELLO STATISTICO-NEURALE, DI PREDEFINIRE I TEMPI DI SCAVO DI UNA GALLERIA CON TBM

**Abstract** - ANTONIO MARIA BALDI, GABRIELE CEVENEINI, ROBERTO GAMBASSI & DUCCIO NOTARI - The processing of interval seismic velocities has allowed, by building a statistical-neural model, to predefine the time for excavation of a gallery with TBM.

During the excavation with a TBM of an hydraulic tunnel located in effusive volcanic rocks, it has been necessary to make an accurate reconstruction of the geomechanical profile, so to better manage the work of the cutter. Since the gallery features a high coverage, it has been executed, on the surface, a seismic reflection profile along the axis which allowed to reconstruct, beside the stratigraphic arrangement, also the the resistance of rocks using the «interval velocity». Using these data and comparing with those recorded in already excavated areas, by means of a specific statistical-neural model it was possible to hypothesize the time of TBM advancement along the profile.

**Key words:** Reflection seismic - Interval velocity - TBM - Statistical-neural model.

**Riassunto** - ANTONIO MARIA BALDI, GABRIELE CEVENEINI, ROBERTO GAMBASSI & DUCCIO NOTARI - L'elaborazione dei valori della velocità sismica di intervallo ha consentito, mediante la costruzione di un modello statistico-neurale, di predefinire i tempi di scavo di una galleria con TBM.

Durante lo scavo di una galleria idraulica con TBM, impostata in rocce vulcaniche effusive, si è resa necessaria una puntuale ricostruzione del profilo geomeccanico, in maniera da meglio

---

(\*) *Antonio Maria Baldi*, S.G.G. - Siena (Italia) baldi@sgg.it; *Gabriele Ceveneini*, Dipartimento di Chirurgia e Bioingegneria Università degli Studi di Siena - Siena (Italia) cevenini@unisi.it; *Roberto Gambassi*, Microcosmos - Siena (Italia) roberto@microcosmos.coop; *Duccio Notari*, S.G.G. - Siena (Italia) notari@sgg.it

gestire i lavori della fresa. Essendo la galleria caratterizzata da una copertura elevata è stato eseguito, in superficie, un profilo sismico a riflessione in corrispondenza del suo asse che ha permesso di ricostruire oltre l'assetto stratigrafico anche, a mezzo della «velocità intervallo», le caratteristiche di resistenza delle rocce. Utilizzando questi dati e confrontandoli con quelli registrati nelle zone già scavate, a mezzo di uno specifico modello statistico-neurale, si è riusciti ad ipotizzare i tempi di avanzamento delle TBM lungo tutto il profilo.

**Parole chiave:** Sismica a riflessione - Velocità intervallo - TBM - Modello statistico neurale.

## INTRODUZIONE

Durante lo scavo di una galleria idraulica, della lunghezza di circa 26 km, realizzata mediante l'attacco dalle due estremità con altrettante TBM, si è offerta la possibilità di costruire un modello di simulazione che riuscisse a prevedere le zone di difficoltà nello scavo ed in subordine il tempo complessivo di scavo.

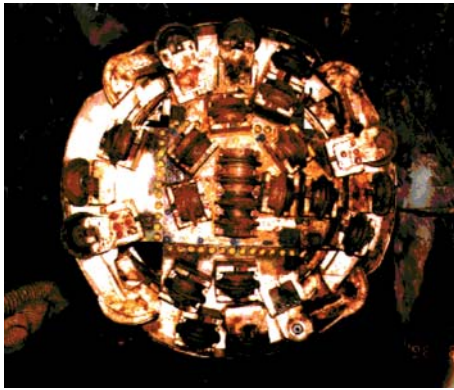


Fig. 1 - Testa di una TBM.

La galleria in esame interessava esclusivamente dei litotipi vulcanici effusivi ed era caratterizzata da una copertura media di 700 m con un massimo di ben 1.200 m; l'eterogeneità propria di queste serie effusive rendeva inutile il ricorso a puntuali sondaggi geognostici, che in relazione anche dell'elevata copertura, risultavano estremamente complessi ed onerosi. Al fine di ottenere informazioni utili allo scavo e per ricostruire, con maggior dettaglio, il «profilo geologico» sull'asse della galleria è stato eseguito, in superficie sul tracciato di

detto asse, un profilo sismico a riflessione per tutta la lunghezza della futura galleria la cui interpretazione ha consentito di ottenere informazioni dettagliate e puntuali circa l'assetto stratigrafico e tettonico sull'avanzamento della galleria.

## INDAGINE SISMICA

Per l'acquisizione dei profili sismici a riflessione si è operato nel modo seguente:

### *Strumentazioni*

- 64 canali simultaneamente attivi (n° 3 Geometrics «geode 24 ch») e computer portatile per la registrazione dei dati di campo;
- 64 stringhe di 4 geofoni con frequenza di 28 Hz;

- Interdistanza dei gruppi di geofoni paria 10 m l;
- Energizzazione con esplosivo allocato in appositi fori alla profondità di 1,0 – 1,5 m;

*Copertura*

- Il profilo è stato eseguito con copertura 24esima;
- In un tratto con morfologia inaccessibile si è fatto ricorso alla tecnica «under shooting»

*Fase interpretativa*

- per l'elaborazione dei dati è stata adottata una sequenza standard ricorrendo al programma «Vista 3» che ha permesso di pervenire ai seguenti elaborati:
  - Profilo dell'andamento velocità di stack;
  - Sezione velocità (fig. 2 );
  - Sezione profondità.

VELOCITÀ INTERVALLO

L'elaborazione dei dati sperimentali ha altresì permesso di definire, in corrispondenza dell'asse della galleria, la velocità intervallo desunta su ogni singola traccia che costituisce l'insieme del profilo. Tale valore numerico, non corrisponde alla velocità sismica che si ottiene con la sismica a rifrazione, ma fornisce ugualmente un'idea complessiva delle caratteristiche di resistenza della roccia; questo si ottiene dalle singole tracce sismiche in relazione ai vari orizzonti riflettenti; il valore di velocità di intervallo può comunque essere posto in relazione con le caratteristiche di resistenza della roccia e fornisce un elemento riassuntivo della sua integrità o alterazione.

Il calcolo della velocità intervallo si ottiene a mezzo della formula di Dix (forma completa):

$$V_k \cong \sqrt{\frac{1}{\Delta t_k} \left( V_{stack(k)}^2 \sum_{i=1}^k \Delta t_i - V_{stack(k-1)}^2 \sum_{i=1}^{k-1} \Delta t_i \right)}$$

generalmente tale formula viene anche impiegata nella sua versione semplificata (VRMS) in situazioni ove i vari orizzonti presentano velocità simili:

$$Vi = \sqrt{\frac{v_2 t_2 - v_1 t_1}{t_2 - t_1}}$$

I valori di velocità intervallo, calcolati con la formula semplificata (VRMS), sono stati calcolati in corrispondenza dell'asse della galleria per tutto il suo sviluppo ed introdotti nel modello statistico che sarà descritto nel successivo paragrafo.

## MODELLO STATISTICO-NEURALE

Sulla base dei valori della velocità intervallo ottenuti con un intorno verticale per ogni traccia di 25 metri è stato predisposto un modello di elaborazione statistica lungo tutto l'asse della galleria con passo di campionamento progressivo, sia per la parte già perforata che per quella ancora da perforare, di 1 metro (fig.3). Tale valore di precisione sebbene possa sembrare in prima istanza pretenzioso, è stato adottato per consentire, a tutti gli elementi introdotti nel modello, un grado maggiore di «puntualità».

Per le parti già escavate dalla TBM la velocità di intervallo è stata posta in relazione con la velocità oraria di avanzamento della fresa ed inoltre si è tenuto conto anche di tutti i tempi di manutenzione; più in particolare i parametri su cui è stata possibile la costruzione del modello sono quelli elencati nella tabella sotto riportata:

PER LA ZONA GIÀ ESCAVATA	PER LE PARTI DA ESCAVARE
<i>Litologia effettiva</i>	<i>Litologia presunta</i>
<i>Spessore copertura</i>	<i>Spessore copertura</i>
<i>Velocità oraria di avanzamento TBM</i>	<i>Aree di rischio geologico presunto</i>
<i>Tempi legati alla logistica di cantiere</i>	
<i>Velocità giornaliera di avanzamento TBM</i>	
<i>Dati macchina</i> (giri/minuto, efficienza, pressione)	
<i>Indice R.M.R.</i>	
<i>Classe di scavo</i>	
<i>Presenza di acqua</i>	
<i>Velocità sismica di intervallo</i>	<i>Velocità sismica di intervallo</i>
<i>Presenza di lineazioni tettoniche</i> (compresa una fascia di approssimazione)	<i>Presenza di lineazioni tettoniche</i> (compresa una fascia di approssimazione)

La prima analisi di fattibilità ha consentito la verifica dell'esistenza di relazioni funzionali statistiche tra il fattore da predire T (dipendente) e quelli predittivi fissi e variabili, utilizzando i dati già disponibili di T nei tratti di perforazione già realizzati.



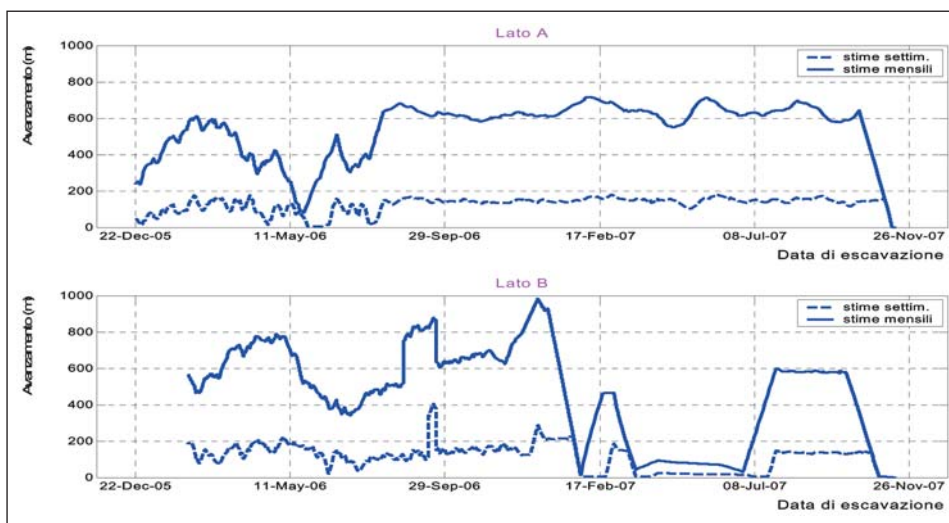


Fig. 4 - Avanzamento specifico previsto per le due TBM.

Sono state inizialmente adottate procedure di correlazione lineare e non lineare, tecniche di regressione mono e multivariata ed infine la tecnica a reti neurali artificiali, incentrate su modelli non lineari che lavorano nello spazio n-dimensionale; quest'ultima tecnica è quella che ha maggiormente convinto circa la sua affidabilità predittiva.

Il modello statistico neurale elaborato, consente infatti, una volta verificata la bontà del fitting del modello stesso sui dati provenienti dalla zona già scavata, di estendere le stime alla zona in predizione oltre il fronte di scavo e fornire indicazioni circa i vari tempi di avanzamento previsti per la TBM in relazione all'interpretazione del profilo sismico a riflessione. Alle varie progressive individuate sono state altresì poste delle indicazioni circa la presenza di lineazioni e le caratteristiche litologiche attese.

Più in particolare l'elaborazione ha indicato la previsione quantitativa, fino alla conclusione degli scavi stessi, in termini di:

- *Ipotesi di avanzamento giornaliero (m/giorno)*
- *Progressiva raggiunta in relazione al giorno di calendario;*
- *Data di ricongiungimento delle due TBM;*

differenziandone le uscite in base a

- *Le ore di funzionamento della fresa (m/ora);*
- *La Classe di scavo prevista;*
- *Indice R.M.R. previsto;*

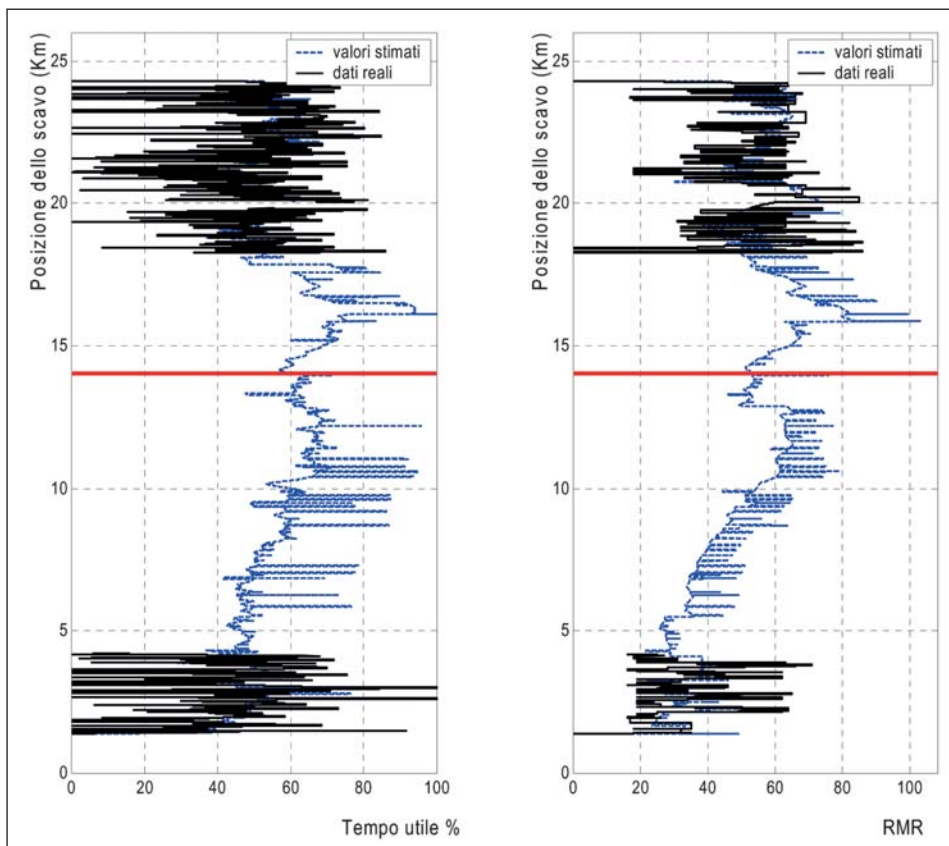


Fig. 5 - Andamento conosciuto e stima dei dati caratteristici in avanzamento: tempi di scavo, indice RMR della roccia e ricongiungimento delle due TBM.

elementi questi, che potevano essere lasciati liberi di variare in corso d'opera anche con la finalità di ottimizzare la gestione ordinaria del lavoro sui due tratti di scavo.

Inoltre il modello rigenerava automaticamente la previsione utilizzando i nuovi dati relativi allo scavo introdotti a seguito dell'avanzamento delle due TBM, fino a perfezionare le stime con una tecnica di apprendimento progressivo che finisce per raggiungere una sempre maggiore attendibilità della previsione essendo la stessa supportata da un maggior numero di dati di ingresso.

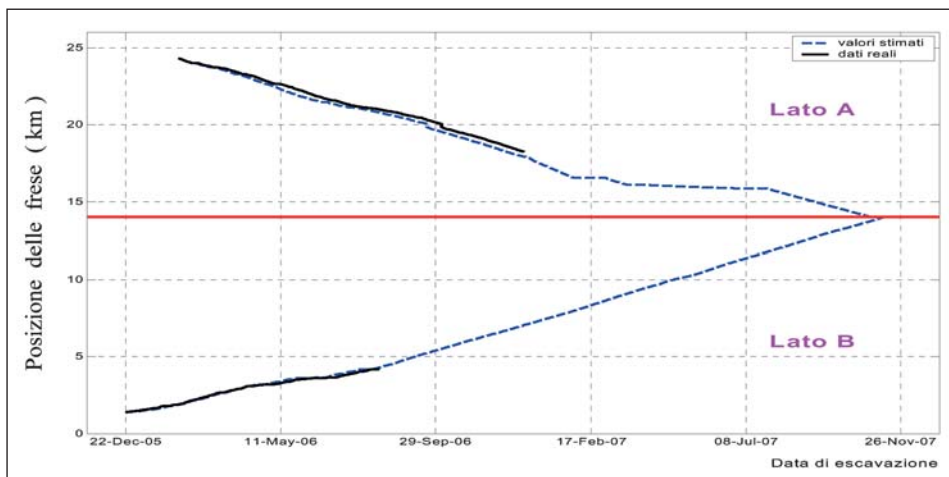


Fig. 6 - Simulazione dell'avanzamento dello scavo delle TBM. (Legenda: in nero lo scavo già effettuato ed in azzurro la simulazione in predizione, in rosso l'ipotesi di ricongiungimento).

## CONCLUSIONI

L'analisi statistico-neurale che utilizza come dati di ingresso le risultanze della prospezione sismica ha consentito di simulare i tempi di avanzamento nello scavo di due TBM mediante un procedimento di rigenerazione automatica a seguito dell'ingresso dei nuovi dati provenienti dallo scavo. Tale metodologia, che è stata impiegata durante la realizzazione dello scavo, fornisce altresì informazioni preziose fin dalla fase della progettazione della galleria.

Questa metodologia, che è stata sperimentata in una situazione particolarmente complessa derivata dalla presenza di serie vulcaniche effusive, è sicuramente più facilmente applicabile in caso di profili di scavo caratterizzati da terreni sedimentari e/o metamorfici.

## BIBLIOGRAFIA

- BALDI A.M. & BIANCHI F., 1999 - Sperimentazione della tecnica di rilievo sismico a riflessione T.S.P. per l'esplorazione sull'avanzamento delle gallerie. Atti XX Congresso Nazionale di Geotecnica: «Sviluppi nell'esecuzione e nell'impiego delle Indagini Geotecniche», *Associazione Geotecnica Italiana*, Parma.
- BALDI A.M., BIANCHI F., BOERIO V., FRANCA S. & GIORGI F., 2001 - New layout of A1 Florence-Bologna highway: integrated seismic reflection survey and tomographic



- inversion to perform structural geological modelling along the main tunnel route, *Atti Congresso «ITA 2001 World Tunnel Congress: Progress in tunnelling after 2000»*, Milano. Ed. Patron, Bologna vol. I, pp. 147-156.
- BALDI A.M., BIANCHI F., BOERIO V., FRANZIA S. & GIORGI F., 2001 - Construction of third lane along the A1 highway across hilly florence outskirts: geophysical investigation at tunnel routes, *Atti Congresso «ITA 2001 World Tunnel Congress: Progress in tunnelling after 2000»*, Milano, Ed. Patron Bologna vol. I, pp. 157-167.
- BALDI A. M., BIANCHI F., GIORGI F., DE MARCO M., LOCATELLI E. & FERRARI F., 2006 - The reconstruct of the geologic section of motorway tunnels with seismic survey: «Connecting road from A4 to Valtrompia». Lumezzane - Brescia. *Atti del Congresso «Fifteenth international symposium on Mine Planning & Equipment Selection»*, Torino, Vol. 1, pp. 525-530.
- BALDI A.M, FUOCO S. & DE LUCA J., 2006 - Application of new seismic methodologies for the solution of geomechanic problems connected to the excavation of tunnels. *Atti del Congresso «Fifteenth international symposium on Mine Planning & Equipment Selection»*, Torino, Vol. 1, pp. 531-536.
- BALDI A.M., FUOCO S., CUCINO P. & NUCOLUSSI PAOLAZ P., - 2007 - Lo scavo della galleria stradale di Martignano (Trento): previsioni e riscontri, il ruolo delle indagini geofisiche. *Atti XXII Convegno Nazionale di Geotecnica ad Abano «Previsioni e controllo del comportamento delle opere»*. Bologna, Patron Editore, pp. 123-130.
- BALDI A.M., 2007 - La sismica a riflessione a quota 2.000: in inverno sulle Alpi ed in estate in Etiopia. *Atti del workshop in geofisica «Geofisica e tecniche di indagine non invasiva applicate agli ambienti estremi»*, Rovereto, Edizioni Osiride, pp. 115-123.
- BRINGIOTTI M., 1996 - Guida al Tunnelling. *L'arte e la tecnica*, Edizioni PEL.
- CARDARELLI E. *et. al.*, 2007 - Indagini geofisiche integrate in galleria, GNGTS Parma.
- KAUS A., WOLF BOENING & PARTNER GbR., 2008 - BEAM-Real Time Ground Prediction while Tunnel-Drivage.
- KNEIB G. *et. al.*, 1999 - Automatic seismic prediction ahead of the tunnel bore machine, *Atti dell'EAGE 61st Conference and Technical Exhibition*, Helsinki, Finland, 7-11 June, pp. 4-45.
- PETRONIO L. *et. al.*, 2004 - Utilizzo del rumore generato da una TBM (Tunnel Boring Machine) come sorgente di prospezione sismica «while drilling: risultati preliminari. GNGTS, *Atti del 18° Convegno Nazionale / 04.10*.
- SATTEL G. *et. al.*, 1992 - Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods-pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland. *First Break*, vol. 10, January.
- SATTEL G. *et. al.*, 1996 - Tunnel seismic prediction, TSP - some case histories, *Tunnels & Tunnelling*.

